



APLICACIÓN DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y CAMPOS DE DEFORMACIÓN PARA EL ESTUDIO DE SISMICIDAD INDUCIDA EN ALMACENAMIENTO PROFUNDO: HONTOMÍN.

Structural Analysis and Active strain-field for Induced Seismicity in gas storage facilities: Hontomin study-case (SPAIN)

R. Pérez-López (1), J. F. Mediato (1), M. A. Rodríguez-Pascua (1), J. L. Giner-Robles (2), R. Martínez-Orio (1), A. Arenillas-González (1), P. Fernández-Canteli (1), J. C. de Dios (3), L. Loubeau (3)

(1) IGME – Instituto Geológico y Minero de España – Geological Survey of Spain. C/Ríos Rosas 23, Madrid 28003 – SPAIN. Email: r.perez@igme.es, jf.mediato@igme.es, ma.rodriguez@igme.es, ro.martinez@igme.es, a.arenillas@igme.es, paula.canteli@igme.es

(2) Departamento de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Campus Cantoblanco, Madrid. SPAIN. Email: jorge.giner@uam.es

(3) Hontomin CO₂ - Fundación Ciudad de la Energía, Avda. Presidente Rodríguez Zapatero, s/n, 24492 - Cubillos del Sil (León) SPAIN

Resumen: La determinación de las fallas capaces de disparar terremotos en zonas adyacentes con formaciones geológicas aptas para el almacenamiento profundo de gas, es una tarea que mitiga la ocurrencia de sismicidad inducida por operaciones subterráneas y movimiento de fluidos. Para ello, la determinación del campo de esfuerzos/deformación tectónicos activo ayuda a entender los patrones tridimensionales de fracturación cartografiados no solo en la zona, sino también en la propia roca almacén. Por este motivo, se presenta un protocolo de trabajo para la obtención del campo de deformación (σ_{Hmax} , σ_{Hmin}) que ayude a entender el papel de cada conjunto de fallas cartografiado. Para ello, aplicamos el Análisis Poblacional de fallas en dos zonas de influencia: 1) Campo cercano: 10 km de diámetro del almacenamiento y 2) Campo Lejano: 20 km de diámetro. Sobre estas zonas calculamos las trayectorias de deformación y llevamos a cabo una cartografía sistemática de fallas. Se presentan los resultados preliminares de Hontomín.

Palabras clave: Sismicidad Inducida, campo de deformación, análisis frágil, Hontomín.

Abstract: The cartography of *seismogenic active faults in adjacent areas of underground gas storage helps in the management for Induced Seismicity related to deep fluid movement and injection/extraction manoeuvres. In this sense, the determination of the Active Stress field into the area allows the understanding of the 3D fracture patterns and their role in earthquake occurrence. We introduce a protocol for study active tectonic stress by using the classical Structural Analysis based on brittle techniques. Accordingly, we have defined two different areas for studying: (1) Near field, 10 km of diameter from the Storage Site and (2) Far Field, 20 km diameter. Preliminary results for Hontomin site are presented.*

Key words: *Induced Seismicity, strain field, brittle analysis, Hontomin SPAIN.*

INTRODUCCIÓN:

La Planta experimental de almacenamiento de CO₂ de Hontomín (Burgos), es el único emplazamiento “on-shore” en operación en Europa, reconocido por la UE como “key test facility” y gestionado por CIUDEN (Fundación Ciudad de la Energía). En este contexto, los estudios de sismicidad inducida aparecen como una de las líneas de trabajo para establecer modelos sobre la relación entre las operaciones de inyección, los terremotos inducidos y las fallas activas en la zona que pudieran ser disparadas.

El campo de esfuerzos/deformación activos de la Península Ibérica se ha estudiado a partir de los terremotos registrados en época moderna por la Red Sísmica Nacional (Stich et al., 2006), así como desde la inversión de fallas mediante el denominado Análisis Poblacional, combinado con el estudio de los mecanismos focales de terremotos (Herraiz et al., 2000). Estos estudios se han realizado a una escala regional lo que complica su aplicación al estudio de la potencialidad de la red de fracturas de roca almacén para su uso como almacenamiento profundo de gas.

La presencia de “fallas maestras”, fallas con longitud suficiente para disparar terremotos de magnitud superior a M6 (3 km de expresión en superficie afectando materiales de edad Cuaternaria), pueden estudiarse bajo el paraguas de los campos regionales de esfuerzos y deformación. Sin embargo, es conveniente saber el campo de deformación para contextualizar el papel de fallas menores que puedan dar lugar a sismicidad inducida.

La falla de Ubierna (Tavani et al., 2011) aparece como la falla activa con capacidad de disparar terremotos de magnitud igual o superior a M6 en el entorno de la zona, así como las fallas secundarias asociadas al contexto tectónico local. Es una falla de orientación NW-SE, desgarre diestro, cuya terminación sur pasa a fallas inversas con control del paisaje y del relleno de las cuencas del Ebro y del Duero. Con más de 50 km de longitud, se encuentra bien orientada respecto al campo de esfuerzos actual (Herraiz et al., 2000), presenta segmentos de 15 km que podrían romper en un único terremoto de un tamaño entre M 6.6 y 6.7 según las relaciones empíricas de Wells y Coppersmith (1994).

En este trabajo, hemos realizado un estudio de los campos de esfuerzos/deformación tectónicos activos mediante la aplicación del Análisis Poblacional de Fallas (Capote et al., 1990), en afloramientos en el entorno al almacenamiento profundo de Hontomín (Burgos). Dando un paso más, hemos aplicado una metodología en relación a la determinación de campos de deformación en campo cercano (10km) y en campo lejano > 20 km)(Pérez-López (2015).

Por supuesto que hay otras metodologías como el estudio de *breakout* y esfuerzos "in situ" (Zheng, 1989, Ljunggren et al., 2003), a partir de datos de sondeos profundos. Sin embargo, el método que proponemos es bastante sencillo y económico, a la par que permite incorporar sus resultados a los modelos dinámicos de almacenamiento para estudiar su evolución en el tiempo.

Los resultados preliminares obtenidos muestran dos campos de deformación activos cuya máxima deformación horizontal se orienta según NW-SE y NE-SW, cuya evolución tectónica de la parte SE del límite de la cuenca vasco-cantábrica con la cuenca el Duero, descrita desde la orogenia alpina (acortamiento según NNE-SSW), como una tectónica transpresiva con un acortamiento regional N-S que activa desgarres diestros de orientación NW-SE (Tavani et al. 2011).

RESULTADOS PRELIMINARES:

En total se han medido 394 datos estructurales de estría sobre plano de falla mediante el uso de una brújula tectónica, distribuidas en 23 estaciones de medida. La figura 1 muestra la localización de las estaciones y la edad de los materiales sobre los que se ha medido. Se observa que la mayoría de ellos se localizan sobre depósitos carbonatados del Cretácico, apareciendo solo 3 estaciones sobre materiales Neógenos. Obviamente, esto dificulta la interpretación de los campos de deformación activos frente a los campos de esfuerzos alpinos, al no disponer de estaciones de medida de estría sobre material Cuaternario. Para determinar la coincidencia de campos de deformación y filtrarlos de los campos de esfuerzos alpinos, hemos utilizado los campos de esfuerzos regionales definidos por Herraiz et al. (2000), así como el análisis de los mecanismos focales en la zona (Stich et al., 2006).

A partir de los trabajos de Herraiz et al., (2000), el campo de deformación regional neotectónico viene definido por un régimen de desgarre para la cuenca del Duero, con una orientación de σ_{Hmax} según NNW-SSE, el cual coincide con el de varias estaciones de medida (Tabla 1).

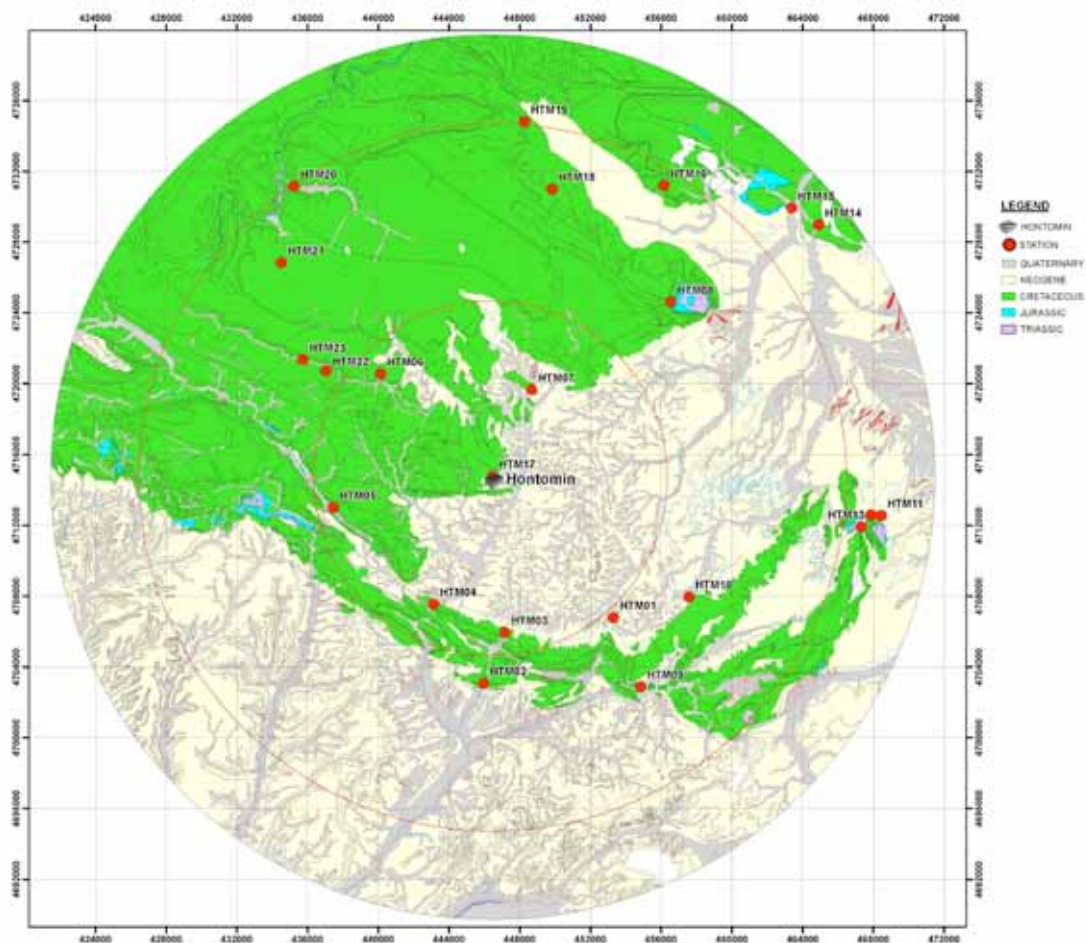


Figura 1: Distribución espacial de las estaciones de medida de datos estructurales en el entorno al almacenamiento de Hontomín en relación con la geología. La ausencia de estaciones de medida en materiales neógenos obedece al tipo de litología, principalmente margas y arcillas blandas. Círculo menor, campo cercano 10 km. Círculo mayor, 20 km campo lejano. Proyección UTM huso 30.

Figure 1. Spatial distribution of natural outcrops for measuring kinematic markers on fault planes in Hontomín nearby. The lack of field points on Neogene deposits is related to the presence of clays and marls. Circle 10 km near-field, 20 km far-field. UTM projection

La figura 2 muestra un detalle de los planos de falla con estrías medidos en la zona denominada Cantera Polar (HTM02, ver figura 1 para localización).



Figura 2: Detalle de un plano de falla con estrías correspondientes a movimiento en desgarre con eslicolitos (sentido de movimiento, diestra). Los materiales son dolomías cretácicas. Se midió el sentido de buzamiento, buzamiento y cabeceo de la estría para la reconstrucción de paleodeformación

Figure 2: Snapshot of a fault plane with striations affecting Cretaceous dolomite. Strike slip movement is observed from the pitch value.

La medida de los campos de deformación a partir del análisis cinemático sobre planos de falla en los alrededores del almacenamiento profundo, así como su comparación con datos sísmicos (mecanismos focales de terremotos cercanos o producidos bajo el mismo régimen de esfuerzos), y de la comparación con los esfuerzos regionales medidos por otros autores, permite estimar el papel de las fallas reconocidos en los modelos dinámicos 3D de las zonas de almacenamiento.

estacion	localidad	Nº FALLAS	MODA	σ_{Hmax}	EDAD
HTM-01	Tobes	7	DESGARRE	N50-N150	Neogeno
HTM-02	Cantera Polar	34	DES-INV	N150	Cretácico
HTM-03	La Casilla	8	DESGARRE	N24	Cretácico
HTM-04	Cruce La Polera	17	NORMAL-DES	N20-N130	Cretácico
HTM-05	Diapiro	18	INV-DESGARRE	N140	Triásico
HTM-06	La Masa	5	DESGARRE	N160	Cretácico
HTM-07	Cernegula	13	INVERSAS	N50	Cretácico
HTM-08	Felix	10	DESGARRE	N40	Jurásico
HTM-09	Temíño	25	DESG-INV	N50	Cretácico
HTM-10	Rublaqueo de arriba	8	.....	N20-N50	Neogeno
HTM-11	Salinillas	8	INVERSAS	N60	Neogeno
HTM-12	Torraz	11	.....	N100	Jurásico
HTM-13	Santa Casilda	24	INV-DESGARRE	.....	Cretácico
HTM-14	Pina de Bureba	8	.....	N34	Cretácico
HTM-15	Terminon	13	INV-DESGARRE	N-S	Jurásico
HTM-16	Hozabejas	5	.....	N70	Cretácico
HTM-17	La Planta	105	NORMAL-DES	N70-N110	Cretácico
HTM-18	Villalta	11	INV-DESGARRE	N30	Cretácico
HTM-19	Pesadas	20	INV-DESGARRE	N60	Cretácico
HTM-20	Sedano	11	DESGARRES	N70	Cretácico
HTM-21	Pto. Paramo de Masa	14	INV-DESGARRE	N140	Cretácico
HTM-22	Nidaguila	5	.....	N-S	Cretácico
HTM-23	El Hoyo	14	DESGARRES	E-W	Cretácico

Tabla 1: Resumen de los datos estructurales medidos en el entorno al almacenamiento de Hontomín. En puntos las estaciones sin analizar mediante el Modelo de deslizamiento.

Table 1: Structural data summary for all the outcrop stations. Dashed points are stations with no result yet. The orientation of σ_{Hmax} was calculated by using the Slip Model.

La capacidad de reconstruir el estado de deformación, permite estimar el comportamiento de cada familia de fallas reconocida mediante sondeos y estudios geológicos en la formación que se utilizará

como roca almacén. De esta forma, será más sencillo estudiar la capacidad de disparo de terremoto de cada falla involucrada en cambios en su presión de confinamiento así como en presencia de fluidos a presión. El siguiente paso, será estudiar las fallas activas reconocidas en la zona así como las fallas capaces sin marcadores de actividad cuaternaria pero que se encuentran bien orientadas respecto al campo de esfuerzos, para así poder estimar el peligro de una potencial sismicidad inducida.

CONCLUSIONES:

(1) El análisis estructural de fallas de campo cercano en el entorno de almacenamientos geológicos permite establecer el régimen de la deformación, el cual caracteriza los diferentes tipos de fallas interpretados en el modelo dinámico.

(2) En el caso de HONTOMIN, se observan dos campos de la deformación caracterizados por σ_{Hmax} según N150°E y N50°E, en régimen de desgarre. Estos campos activan desgarres de carácter inverso según NE-SW, fallas inversas con orientación NE-SW a N-S, y fallas normales con orientación E-W.

(3) El estudio de fallas activas en la zona, y que estén bien orientadas respecto al campo de la deformación permitirá establecer la potencialidad de disparo de terremotos tectónicos de magnitud superior a M5. De todas ellas, la falla de Ubierna, situada en línea recta a 10 km en el cuadrante SW de las instalaciones de almacenamiento de Hontomin, presenta un elevado potencial de disparo de terremoto de magnitud superior a M 5 incluso M6, afectando a materiales del Cuaternario (Tavani et al., 2011) y estando bien orientado según el campo de deformación. Se han reconocido segmentos geométricos con capacidad sismogénica. Habrá que estudiar la influencia de una potencial sismicidad inducida en la zona.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto europeo ENOS: "ENabling Onshore CO₂ Storage in Europe" en la convocatoria Horizonte 2020 (Project ID: 653718).

Referencias bibliográficas

- Capote, R., G. De Vicente y J.M. González-Casado. (1990). Evolución de las deformaciones Alpinas en el Sistema Central Español (S.C.E.). Geogaceta 7, 20-22.
- Herraiz, M., De Vicente, G., Lindo-Naupari, R., Giner, J., Simón, J.L., González-Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, A.L., Ramírez, M., Lucini, M. (2000). The recent (upper Miocene to Quaternary) and present tectonic stress distributions in the Iberia Peninsula. *Tectonics* 19, 762-786.
- Ljunggren, C., Yanting Chang, J. T. & Christiansson, R. (2003). An overview of rock stress measurement methods. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* 40, 7-8. Special Issue on Rock Stress Estimation.

- Pérez-López, R. (2015). *Proyecto SIAGAS – YELA. Informe interno sobre la aplicación de campos de esfuerzos en el estudio de almacenamiento profundo*. IGME. 150 p.
- Stich, D., Serpelloni, E., Mancilla, F. L., Morales, J. (2006). Kinematics of the Iberia-Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics* 426: 295-317.
- Tavani, S., Quintá, A., Granado, P. (2011). Cenozoic right-lateral wrench tectonics in the Western Pyrenees (Spain): The Ubierna Fault System. *Tectonophysics* 509: 238-253.
- Wells, D.L. y K. J. Coppersmith. (1994): New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bull. Seismol. Soc. America* 84(4), 974-1002.
- Zheng, Z., Kemeny, J. and Cook, N.G.W. (1989). Analysis of Borehole Breakouts. *Journal of Geophysical Research* 94(B6): 7171-7182.

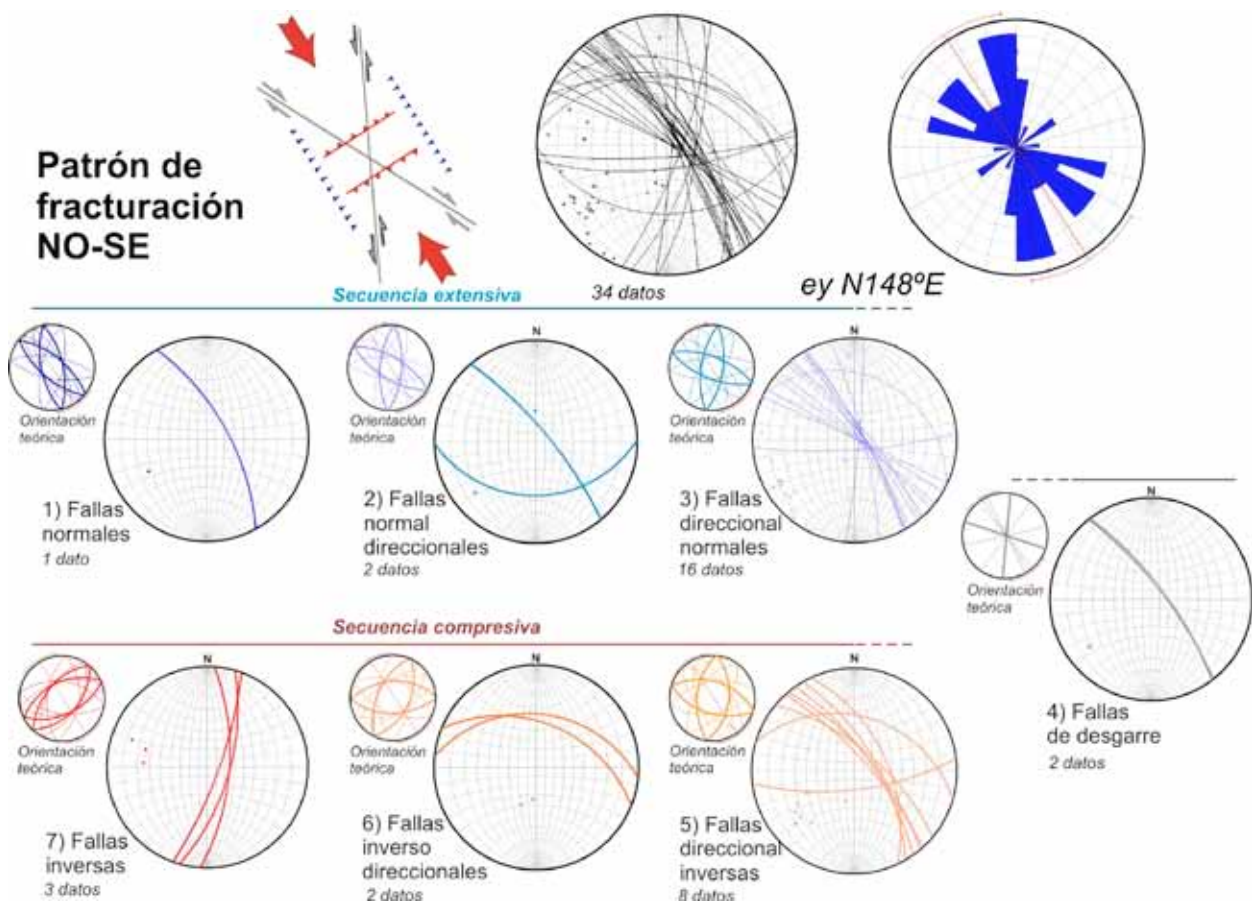


Figura 3: Ejemplo de análisis de una de las estaciones de medida estructural. Representación de datos en ciclográfica de la dirección y buzamiento de las fallas medidas. En menor tamaño a la izquierda aparece la orientación teórica para un acortamiento N150.

Figure 3: Ciclographic representation of faults for the Cantera Polar station. Theoretical ciclographic plot is plotted in small size up and left to the principal plot.